

УДК 697.92

Гумен Олена Миколаївна

Доктор технічних наук, доцент, професор кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, ORCID: 0000-0003-3992-895X

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Довгалюк Володимир Борисович

Кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції, ORCID: 0000-0002-4836-5354

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Мілейковський Віктор Олександрович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОФІЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШОК ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ МІЖ СУПУТНИМИ АБО ЗУСТРІЧНИМИ ПОТОКАМИ

Анотація. Для розробки енергоефективного обладнання опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, а також схем організації повітрообміну, необхідні аналітичні підходи до визначення параметрів турбулентних течій. Розглянуто спрощений підхід до визначення профілю температури та концентрації домішок у примежовому шарі між супутніми та зустрічними потоками на підставі підходу професора А. Я. Ткачука до моделювання турбулентних течій з турбулентною мікроструктурою. Запропоновано спрощену схему макроструктури примежового шару. Використано геометричний та кінематичний аналіз цієї схеми. На підставі цього підходу розглянуто примежовий шар початкової ділянки вільної струмини. Уточнена схема струмини з відмінною температурою або концентрацією домішок від параметрів навколишнього середовища. Ця схема враховує складні тепломасообмінні процеси за наявності великомасштабної вихрової структури. Показано хороший збіг отриманих результатів з відомими дослідними даними.

Ключові слова: примежовий шар змішування; турбулентний потік; турбулентна макроструктура; турбулентна струмина

Постановка проблеми

Енергоефективність опалення, вентиляції та кондиціонування повітря досягається ефективною роботою обладнання та оптимізацією організації повітрообміну в приміщеннях. Більшість потоків у цих системах є турбулентними, тобто параметри в кожній точці течії пульсують у часі. Одним з випадків є турбулентні потоки, що рухаються в одному напрямку або назустріч, наприклад:

- струминний примежовий шар початкової ділянки затопленої струмини (рис. 1) з рівномірним профілем швидкості на виході в потоку або нерухомому середовищі;
- зустрічні потоки нижньої підводки опалювального приладу однотрубною вертикальною системою опалення при перекритій верхній підводці.

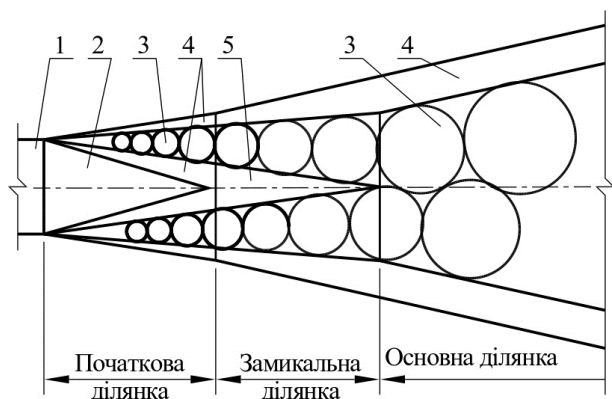


Рисунок 1 – Схема вільної струмини [1]:
1 – патрубок, 2 – ядро постійної температури й концентрації, 3 – вихровий примежовий шар, 4 – зони дрібновихрового тепломасопереносу, 5 – ядро постійної швидкості

Подібні течії характерні для технологічних апаратів, повітряних і водяних мас у природних умовах тощо. Тому результати досліджень актуальні не лише для інженерного забезпечення будівель, але і для екології, технологічного обладнання тощо.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Для теоретичного визначення параметрів турбулентних потоків існує лише один точний метод, який не вимагає додаткових експериментальних констант і фіктивних фізичних величин. Це – пряме чисельне розв’язання рівнянь Нав’є-Стокса (DNS) з подальшим усередненням отриманих результатів [2]. Щоб не втратити інформацію щодо турбулентних пульсацій, крок сітки має бути меншим за розмір найменшого можливого вихору в потоку. Таким чином можливо змодельовувати лише невеликі за розміром об’єкти (з урахуванням обсягу пам’яті для зберігання сітки) за наявності потужних суперкомп’ютерів та достатніх часових ресурсів (порядку 10^4 - 10^5 годин процесорного часу [2]). У реальних умовах перше призводить до дорожчання продукції, а друге – до втрати її актуальності.

Для зменшення потреб у ресурсах крок сітки збільшують, а втрачену інформацію замінюють фіктивними величинами на кшталт турбулентної в’язкості, турбулентного числа Прандтля, а також експериментальними коефіцієнтами [3-7].

Для отримання простого аналітичного опису окремих випадків турбулентних течій приймаються спрощення. Одним з прикладів є подібність струминного примежового шару на основній та початковій ділянках струмини [1]. На підставі відомих [1] експериментальних досліджень (рис. 2) було показано [8], що примежовий шар на початковій ділянці не є подібним до основної

ділянки струмини. В середині початкової (та замикальної для неізотермічних струмин) ділянок залишається ядро постійної швидкості, яке звужується за ходом струмини. На його межах утворюється струминний примежовий шар у результаті взаємодії потоку ядра з навколишнім середовищем (нерухомим або рухомим). З обох боків від примежового шару вихрові структури є дрібномасштабними або відсутні. У примежовому шарі формуються великомасштабні вихори – клуби. Тому профіль швидкості близький до симетричного.

Незначна асиметрія (рис. 2) пов’язана з різним турбулентним станом у ядрі та навколишньому середовищі. Для більшості практичних задач опалення, вентиляції, кондиціонування повітря тощо цю асиметрію можна не враховувати. Це – примежовий шар між потоками.

На основній ділянці струмини ядра немає. Примежовий шар межує з одного боку з таким же примежовим шаром (з великомасштабною структурою), а з іншого боку – з навколишнім середовищем без клубів. Тому профіль швидкості є суттєво асиметричним [1].

У неізотермічних струмин та струмин з відмінною від навколишнього середовища концентрацією домішок різниця між примежовими шарами поглиблюється. Найбільш інтенсивний тепломасообмін іде у вихровому примежовому шарі 3, що містить великі вихори – клуби. Теплопровідність та дрібновихрова турбулентна дифузія відіграють другорядну роль.

Тепломасоперенос не може обмежитися вихровим примежовим шаром 3. Поза межами формуються зони 4 дрібновихрового тепломасопереносу, де ці процеси відбуваються за рахунок дії турбулентних пульсацій, теплопровідності та «фізичної» дифузії.

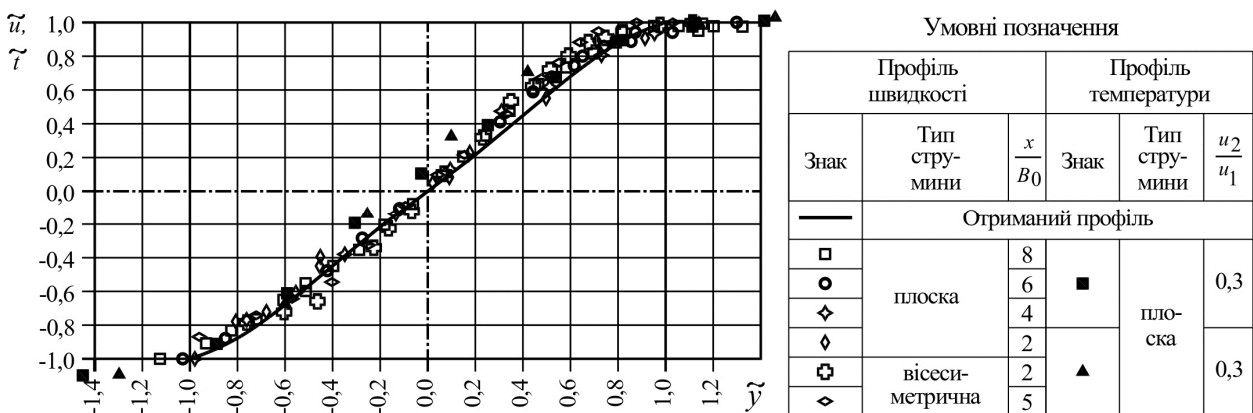


Рисунок 2 – Профіль швидкості та температури: суцільна лінія – отриманий профіль швидкості [9] та температури (13), точки – дослідні дані [1]

Таким чином, ядро постійної температури та концентрацій 2 (рис. 1) суттєво менше за ядро постійної швидкості.

Теплова та концентраційна ширина струмини суттєво більша за динамічну. На початковій ділянці є обидва ядра, а на замикальній [1] – лише ядро постійної швидкості. На обох цих ділянках вихровий примежовий шар 3 з обох боків охоплений зонами 4 дрібновихрового тепломасопереносу.

На основній ділянці такі зони є лише на зовнішніх межах шару 3, а на осі струмини вихрові струминні примежові шари проникають один до одного. Тому слід очікувати принципову різницю між примежовими шарами на основній та інших ділянках.

Для уникнення використання фіктивних величин та експериментальних коефіцієнтів професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури А. Я. Ткачук [10, 11] виконав аналітичний опис примежових шарів без використання додаткових величин, але з урахуванням ролі турбулентних вихорів за методом особливостей.

За відомою теоремою гідродинаміки ідеальної рідини (газу) безперервний безвихровий рух нестисливої рідини (газу), що заповнює безмежний простір і перебуває нерухомим у нескінченності, можна викликати відповідною системою вихрових шнурів. Таким чином А. Я. Ткачук проаналізував пристінні примежові шари. Отримано хороший збіг з відомими дослідними та теоретичними даними.

Формулювання мети статті

Метою роботи є моделювання розподілу температури та концентрації домішок між потоками, що рухаються в одному напрямку або назустріч.

Основна частина

Розглянемо два турбулентних потоки 1 та 2 з рівномірним профілем швидкості, що рухаються в одному або протилежних напрямках з відповідною температурою $t_{п,1}$ та $t_{п,2}$ ($t_{п,1} \geq t_{п,2}$).

Узагальненням підходу А. Я. Ткачука на примежові шари з великомасштабною структурою є геометричний та кінематичний аналіз їхньої макроструктури. Для цього вважатимемо [8, 9, 12], що клуби мають правильну геометричну форму та відіграють визначальну роль у формуванні примежового шару.

Спрощена схема струминного примежового шару між плоскими потоками (рис. 3) передбачає вихрову пелену з великомасштабних вихрових

шнурів (клубів), що котиться потоками. Радіус клуба r відповідатиме половині ширини вихрового шару.

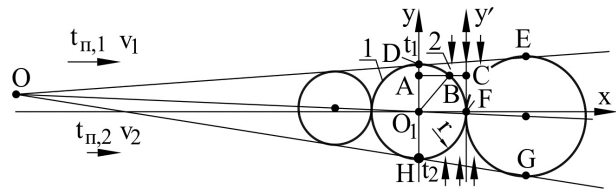


Рисунок 3 – Схема вихрового примежового шару між потоками: 1 – клуб, 2 – міжклубний шар

Розглянемо профіль усередненої температури в межах вихрового примежового шару. Початок координат (рис. 3) сумістимо з центром O_1 миттєвого положення окремого клуба 1. Вісь абсцис x відповідає напрямку руху одного з потоків. Вісь ординат y спрямуємо перпендикулярно до осі x у напрямку від потоку 2 до потоку 1.

Позначимо відносну температуру

$$\tilde{t} = \frac{t - t_k}{\Delta t}, \quad (1)$$

де t_k – середня температура потоків на межі (приблизно дорівнює температурі на лінії осі клубів)

$$t_k = \frac{t_1 + t_2}{2}; \quad (2)$$

t_1 та t_2 – температура, відповідно, потоку 1 та 2 біля межі клубів. За рахунок теплопровідності та турбулентних пульсацій у зоні дрібновихрового тепломасопереносу $t_{п,1} > t_1 > t_2 > t_{п,2}$; Δt – різниця між температурою t_k та температурою кожного потоку t_i :

$$\Delta t = |t_k - t_i| = \frac{t_1 - t_2}{2}, i = 1, 2. \quad (3)$$

Також позначимо відносну ординату $\tilde{y} = y/r$, де r – половина ширини примежового шару.

Вихрову пелену доцільно розглядати як сукупність клубів, між якими розташовані міжклубні шари [12]. Для усереднення температури достатньо взяти вздовж осі x діапазон, що містить половину клуба 1 – між осями y та y' .

Оскільки напрямок руху центрів клубів у загальному випадку не збігається з напрямком осі x , то точка перетину клубів F не збігається з точкою торкання осі y' . (на рис. 3 накладається на точку F). Але для достатньо широкого діапазону параметрів похибка від неврахування цього факту не перевищує 5%. З іншого боку, у реальних умовах між клубами не може бути точки торкання, а існує відстань, де формуються вторинні вихори. Тому вплив сусідніх клубів не враховується.

Середня температура визначається аналогічно вільним струминам [12] шляхом усереднення

швидкості за клубом і міжклубним шаром вздовж відрізка AC при довільному значенні y :

$$t = \frac{t_k |AB| + t_m |BC|}{|AC|} = t_k + t_m, \quad (4)$$

де t_k та t_m – середня температура, відповідно, у клубі 1 та міжклубному примежовому шарі 2 вздовж відрізків AB та BC; $|AB|$, $|BC|$ та $|AC| = r$ – довжина, відповідно, відрізків AB, BC та AC; $t_k = \bar{t}_k |AB|/|AC|$ та $t_m = \bar{t}_m |BC|/|AC|$ – складові середньої температури в клубі та міжклубному шарі.

Довжина відрізка AB знаходиться з розв'язання трикутника $\triangle ABO_1$, $|AO_1| = y$; $|BO_1| = r$; кут $\angle BAO_1$ прямий. Тоді

$$\frac{|AB|}{|AC|} = \frac{(r^2 - |y|^2)^{1/2}}{r} = (1 - |\tilde{y}|^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Довжина відрізка BC визначається як різниця довжини відрізків AC та AB. Тому

$$\frac{|BC|}{|AC|} = \frac{|AC| - |AB|}{|AC|} = 1 - (1 - |\tilde{y}|^2)^{1/2}. \quad (6)$$

Визначення розподілу температури в клубі є достатньо складною задачею. Клуб ежектє рідину або газ із середовища, що його оточує. Тому на межах вихрового примежового шару він має відповідну температуру t_1 та t_2 .

У самому клубі для спрощення формули усередненої температури скористаємося найбільш простою інтерполяційною залежністю за двома граничними точками – лінійною (для основної ділянки струмини [12] така інтерполяція дає хороший збіг з дослідними даними):

$$t_k = \bar{t}_k + \tilde{y} \Delta t, \quad (7)$$

Розглянемо міжклубний шар. Аналогічно до зовнішньої частини міжклубного шару основної ділянки струмини (криволінійного трикутника EFA_{13} у роботі [12]), у криволінійних трикутниках DEF та FGH (рис. 3) відбувається підтікання до клубів. Можна вважати, що в цих трикутниках теплообмін на встигає відбутися. Тому температура в криволінійних трикутниках відповідатиме температурі відповідних потоків. З урахуванням формул (2) та (3):

$$\bar{t}_m = \bar{t}_k + \text{sgn}(\tilde{y}) \Delta t, \quad (8)$$

де sgn – функція, що дорівнює одиниці при додатному аргументі, мінус одиниці – при від'ємному – і нулю – при нульовому.

За висловлених припущень отримані рівняння (1) – (8) точно збігаються з відповідними рівняннями для визначення профілю швидкості [9], якщо замінити позначення швидкості u на температури t . Тому результат буде відповідати рівнянню (13) роботи [9] після заміни позначень:

$$\tilde{t}(\tilde{y}) = \frac{t - t_k}{\Delta t} = \text{sgn}(\tilde{y}) \left(1 - (1 - |\tilde{y}|^2)^{3/2} \right), \quad (9)$$

Профіль (9) збігається з експериментальними даними [1] (рис. 2). Для визначення температури t_1 та t_2 для кожної серії дослідів [1] виконувалася поліноміальна регресія експериментальних даних. Температура t_1 та t_2 визначалися за рівнянням регресії підстановкою ординат меж вихрового примежового шару початкової ділянки струмини.

Подібність експериментальних і аналітично отриманих профілів швидкості та температури показує принципову різницю між примежовим шаром початкової ділянки та основної, де профіль температури є більш наповненим.

У залежностях (1...4, 7...9) можна підставляти не тільки температуру в будь-якій однаковій розмірності ($^{\circ}\text{C}$, K, $^{\circ}\text{F}$ тощо), але і надлишкову температуру понад будь-яку (однакову). Від цього результат розрахунку не зміниться, що дозволяє використовувати отримані залежності для широкого класу задач.

З урахуванням подібності профілів температури t і концентрації C , для розрахунку останнього достатньо замінити в усіх залежностях t на C .

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження спрямовані на аналітичний опис струмин, що взаємодіють між собою. На сьогодні виконано візуальні експериментальні дослідження двох затоплених струмин води, зафарбованих різними флуоресцентними фарбниками – флуоресцеїном натрію (ураніном), що світиться жовто-зеленим кольором, та оптичним відбілювачем для пральних порошоків Реатекс СХТ (ОВА 71), що світиться блакитним кольором.

Отримані фото та відеоматеріали аналізуються задля створення спрощеної схеми макроструктури таких струминних течій. Одним з отриманих результатів є збереження макроструктури струминних течій при їхній взаємодії.

Після завершення аналізу буде виконано аналітичний опис створеної схеми з отриманням параметрів результатних потоків залежно від параметрів струмин, що взаємодіють.

Висновки

На підставі аналізу спрощеної схеми макроструктури одержано профіль температури та концентрації домішок примежового шару між потоками, які рухаються з різною швидкістю в одному або протилежних напрямках. Одержаний профіль відповідає відомим експериментальним даним.

Підтверджено принципову різницю між розглянутим примежовим шаром та основною ділянкою вільних струмин. Різниця пояснюється тим, що на основній ділянці струмини з примежовим шаром межує такий же примежовий шар з великомасштабною вихровою структурою, а розглянутий у даній роботі примежовий шар межує лише з потоками з дрібновихровою структурою. На відміну від основної ділянки струмини профіль

температури розглянутого примежового шару значно ближчий до профілю швидкості.

Запропонований підхід дозволяє аналізувати примежові шари з турбулентною макроструктурою без залучення фіктивних величин та експериментальних констант. У майбутньому буде проаналізовано струмини, що взаємодіють між собою.

Література

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. - М.: Гос. изд-во физ.-мат лит., 1960. - 715 с.
2. Ahlman D. Direct Numerical Simulation of a Plane Turbulent Wall-Jet Including Scalar Mixing / D. Ahlman, G. Brethouwer, A. V. Johansson // *Physics of Fluids*. – Vol. 19, No. 6. – 2007. – P. 065102-1–065102-13. DOI: 10.1063/1.2732460
3. Алямовский А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарёв. – Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с.
4. Gutierrez, L.F. RANS Simulation of Turbulent Diffusive Combustion using Open Foam / L. F. Gutierrez, J. P. Tamagno, S. A. Elaskar // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. – Vol.9, No.2. – 2016. – P. 669-682.
5. T. Cebeci. *Computational Fluid Dynamics for Engineers* / T. Cebeci, J. P. Shao, F. Kafyke, E. Laurendeau. – Long Beach, Heidelberg: Springer, Horizons Publishing, 2005. – XIV, 396 p.
6. T. J. Chung. *Computational Fluid Dynamics* / Chung T. J. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. - xiii, 1012 p.
7. J. C. Tannehill. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer* / R. H. Pletcher, J. C. Tannehill, D. Anderson. – Third edition. – Washington.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – xx, 774 p.
8. Мілейковський В.О. Аналітичні дослідження макроструктури примежового шару між потоками, що рухаються з різною швидкістю / В.О. Мілейковський // Науково-технічний збірник “Енергоефективність в будівництві та архітектурі”. - К.: КНУБА, 2013. - Вип. 5. - С. 90-98.
9. Гумен О.М. Геометричне обґрунтування профілю швидкості примежового шару між супутніми або зустрічними потоками / Гумен О.М., Мілейковський В.О. // Гідраліка і гідротехніка: Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 66. – С. 11-18.
10. Ткачук А.Я. Розрахункова модель усередненого руху в турбулентній зоні плоских і вісесиметричних пристінних примежових шарів / А.Я. Ткачук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2001. – Вип. 2. – С. 3-18
11. Ткачук А.Я. Системы отопления. Проектирование и эксплуатация / А.Я. Ткачук, Е.С. Зайченко, В.А. Потапов, А.П. Целев. - К.: Будівельник, 1985. - 136 с.
12. Мілейковський В.О. Визначення розподілу температури та концентрації в струминному примежовому шарі з використанням геометричного підходу / В.О. Мілейковський // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. - К.: КНУБА, 2009.- Вип. 13. - С.3-8.

Стаття надійшла в редколегію 05.03.2013

Рецензент: д.т.н., проф. В. М. Михайленко, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Гумен Елена Николаевна

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики, ORCID: 0000-0003-3992-895X

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев

Довгалоук Владимир Борисович

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ORCID: 0000-0002-4836-5354

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Мілейковський Виктор Александрович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ОБОСНОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ СПУТНЫМИ ИЛИ ВСТРЕЧНЫМИ ПОТОКАМИ

Аннотация. Для разработки энергоэффективного оборудования отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также схем организации воздухообмена, необходимы аналитические подходы к определению параметров турбулентных течений. Рассмотрен упрощённый подход к определению профиля температуры и концентрации примесей в пограничном слое между спутными и встречными потоками на основании подхода профессора А. Я. Ткачука к моделированию турбулентных течений с турбулентной микроструктурой. Предложена упрощённая схема макроструктуры пограничного слоя. Используются геометрический и кинематический анализ этой схемы. На основании данного подхода рассмотрен пограничный слой начального участка свободной струи. Уточнена схема струи с отличной температурой или концентрацией примесей от параметров окружающей среды. Эта схема учитывает сложные тепломассообменные процессы при наличии крупномасштабной вихревой структуры. Показано хорошее совпадение полученных результатов с известными опытными данными.

Ключевые слова: пограничный слой смешения, турбулентный поток, турбулентная макроструктура, турбулентная струя

Gumen Olena

Doctor of Science, Associate Professor, Professor of the Descriptive Geometry, Engineering and Computer Drawing Department, ORCID: 0000-0003-3992-895X

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

Dovhaliuk Volodymyr

Philosophy Doctor, Professor, Head of Heat Gas Supply and Ventilation Department, ORCID: 0000-0002-4836-5354

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Mileikovskiy Viktor

Doctor of Philosophy, Associate Professor, Associate Professor of Heat Gas Supply and Ventilation Department, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

JUSTIFICATION OF TEMPERATURE AND IMPURITIES CONCENTRATION PROFILE OF BOUNDARY LAYER BETWEEN UNIDIRECTIONAL OR OPPOSITE FLOWS

Abstract. To develop energy efficient equipment for heating, ventilation and air conditioning or schemes of air exchange organization, analytical approaches to determining turbulent flows parameters are needed. A simplified approach to determining of temperature and impurities concentration profiles in the boundary layer between unidirectional and opposite flows is considered by the approach of A. Tkachuk for simulation of flows with turbulent microstructure. A simplified scheme of the boundary layer macrostructure is proposed. Geometric and kinematic analysis of this scheme is used. Based on this approach, the boundary layer of the initial section of the free jet is considered. The scheme of the jet with different temperature or impurities concentration from the environmental parameters is improved. This scheme takes into account complex heat and mass transfer processes at the presence of a large-scale vortex structure. It is shown that the obtained results are in good agreement with known experimental data.

Keywords: mixing boundary layer, turbulent flow, turbulent macrostructure, turbulent jet